

文章编号:1004-4213(2011)09-1428-5

# 光纤移频分布式布里渊光纤传感技术

黄民双, 黄军芬

(北京石油化工学院 光机电装备技术北京市重点实验室, 北京 102617)

**摘 要:**提出了一种利用布里渊光纤环形腔移频技术实现分布式光纤布里渊传感的方法. 该方法基于布里渊光时域分析法原理, 将一束单纵模运转激光器输出的激光分为两束; 一束光入射布里渊光纤环形腔中产生窄线宽的受激布里渊散射光作为斯托克斯光, 另一束光经过低频相位调制后作为泵浦光; 斯托克斯光和泵浦光分别相向入射进入传感光纤, 通过测量布里渊谱得到光纤温度或应变. 利用该方法可将十几 GHz 的微波频率转化为兆赫信号频率进行探测处理, 仅需一台激光器, 因此系统结构简单、成本低, 还可减小激光器频率波动对测量准确度的影响. 实验验证了该方法的可行性.

**关键词:**分布式光纤传感器; 布里渊散射; 光纤环形腔; 布里渊光时域分析法

**中图分类号:** O647.3

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114009.1428

## 0 引言

在石英光纤中将同时产生背向布里渊散射和背向瑞利散射, 它们之间的频差约为 11 GHz (在泵浦激光波长为 1 550 nm 处)<sup>[1]</sup>, 无论采用光学方法还是电子技术提取布里渊散射光都比较困难. 若采用光学滤波方法分离出布里渊散射光, 由于应变或温度引起的布里渊频移变化在 MHz 数量级, 且自发布里渊散射信号极其微弱, 可调谐窄带 F-P 滤波器<sup>[2-3]</sup>和可调谐窄带 Bragg 光纤光栅滤波器<sup>[4]</sup>由于分辨率低或损耗大等原因均难以满足要求. 若采用光外差方法, 不仅要求带宽大于 11 GHz 的超快速光电探测器<sup>[5]</sup>, 而且相应的信号处理电路属于微波电路, 系统结构复杂昂贵. 为了避免使用宽带信号处理电路, H. Izumita 和 M. Niklès 等人<sup>[6-8]</sup>提出采用高频电光调制器产生一束接近布里渊频率的光作为本地光, 与后向布里渊散射光进行外差探测, 但是, 要对电光调制器进行控制, 仍然需要 11 GHz 的微波电路. 如果采用基于光纤中受激布里渊散射光放大原理的布里渊光时域分析法 (Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)<sup>[9-10]</sup>, 不仅需要对两个激光器的频差 (11 GHz) 进行检测、调节并锁定, 而且还要求激光器具备调谐功能, 对激光器的频率稳定性也有很高要求, 系统将更加复杂昂贵. 因此, 目前布里渊探测系统的复杂性和高成本是制约

分布式布里渊光纤传感技术应用的关键问题.

本文提出了一种新的方法, 该方法采用 BOTDA 原理, 但只需要一只分布反馈半导体 (Distributed FeedBack, DFB) 激光器, 利用光纤布里渊环形腔产生窄带受激布里渊散射光取代作为探测光的激光器, 不仅简化系统结构、降低系统成本, 而且将大大提高系统性能.

## 1 光纤布里渊频移器

如图 1, 光纤布里渊频移器由光纤环形器、光纤和光纤耦合器组成, 实际上是一个光纤布里渊环形腔. 当入射光  $I_0$  线宽足够窄并满足受激布里渊散射阈值功率时, 在光纤中将产生背向受激布里渊散射 Stokes 光, 其散射光相对于入射光的频移  $\Delta\nu_B$  主要由介质的声学特性和弹性力学特性决定, 即<sup>[11]</sup>

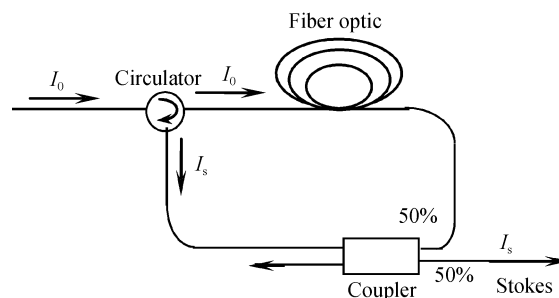


图 1 光纤布里渊频移器  
Fig. 1 Fiber optic Brillouin frequency shifter

基金项目:北京市自然科学基金(No. 4073032)资助

第一作者:黄民双(1964—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感、大地测量仪器等. Email:huangminshuang@bipt.edu.cn

收稿日期:2011-04-14;修回日期:2011-05-30

$$\Delta\nu_B = \nu_0 - \nu_B = 2\nu_0 \frac{nu_a}{c} \quad (1)$$

式中  $\nu_0$ 、 $\nu_B$  分别为入射光和 Stokes 光频率,  $n$  为介质折射率,  $u_a$  为介质中声速,  $c$  为真空中光速. 石英光纤的  $n=1.46$ ,  $u_a=5\,945$  m/s, 对于  $1.55\ \mu\text{m}$  波长入射光, 实验测得的布里渊频移约  $10.86$  GHz.

受激布里渊散射 Stokes 增益曲线具有 Lorentz 线型, 其半宽度  $\Delta\omega$  与声波的阻尼时间或声子寿命  $\tau_a$  有关, 即

$$\Delta\omega = \frac{1}{\tau} \approx \alpha_a u_a \quad (2)$$

式中  $\alpha_a$  是声子的衰减系数. 在单模石英光纤中, 声子寿命约为  $10$  ns, 因此 Stokes 增益曲线半宽度约为  $30$  MHz.

另一方面, 由光学共振腔的模式理论可知, 对于长度为  $L$  的光纤环形腔, 激光的纵模间隔(即自由光谱范围)为

$$\text{FSR} = \frac{c}{nL} \quad (3)$$

式(3)说明了在光纤环形谐振腔中产生受激布里渊散射光的频率条件. 也就是说, 只有 Stokes 光频率  $\nu_B$  相对于入射光频率  $\nu_0$  的频率差  $\Delta\nu_B$  满足

$$\Delta\nu_B = N * \text{FSR} = N * \frac{c}{nL} \quad (4)$$

时, 光纤环形振荡器才可能输出 Stokes 光, 其中  $N$  为整数. 另一方面, 式(1)说明只有在光纤布里渊增益带宽内的纵模才能得到布里渊增益放大. 这意味着光纤环形谐振腔起着频率滤波器的作用, 在纵模频带内的可以放大通过, 而纵模频带外的不能通过.

实验中, 图 1 的入射光  $I_0$  由 DFB 激光器提供, DFB 波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ , 单纵模连续激光输出, 最大输出功率为  $80$  mW, 线宽小于  $10$  kHz; 入射激光经环形器耦合进入光纤, 光纤采用康宁 SMF-28 普通石英单模通信光纤, 芯径为  $9.25\ \mu\text{m}$ , 在波长  $1\,550$  nm 处的损耗为  $0.21$  dB/km. 光纤布里渊环形腔的输出光  $I_s$  经过  $25$  GHz 的超快速光电探测器进行光电转换和  $22$  GHz 的宽带放大器放大后, 送 HP8566A 微波分析仪观测.

图 2(a) 为当光纤长度为  $500$  m, 入射激光功率为  $4$  mW 时观测到的波形. 从图中可以看出: 信号中心频率为  $10.863$  GHz, 线宽约为  $3$  MHz, 其中心频率正好是一级受激布里渊散射 Stokes 光频率与背向瑞利散射光<sup>[12]</sup> 频率(入射光频率)之差, 说明在光纤环形腔产生了较强的窄线宽的受激布里渊散射光. 图 2(b) 为当光纤长度为  $50$  m 时观测到的波形, 实验表明: 此时可以获得更窄线宽的受激布里渊散射光, 只有  $500$  kHz 左右, 但此时需要较强的入射功

率<sup>[13]</sup>. 对于光纤环形腔<sup>[14-15]</sup> 来说纵模带宽是由环形腔的自由光谱范围 FSR 和精细度  $F=4R/(1-R)^2$  决定, 这里  $R=\sqrt{1-\kappa}\sqrt{1-\gamma}\exp(-\alpha L/2)$ , 式中  $\kappa$  和  $\gamma$  分别是光纤耦合器的附加损耗和光强耦合系数, 通过选取  $\kappa$ 、 $\gamma$  和光纤环长度  $L$  参量, 可以获得非常窄的纵模带宽. 因此可以通过选取光纤环形腔的参量获得窄线宽的受激布里渊散射光.

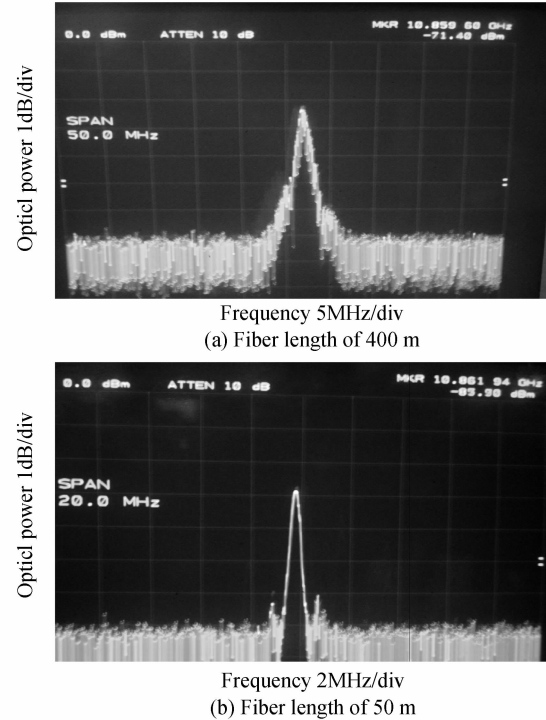


图 2 瑞利散射光和一级布里渊散射光的差频频谱  
Fig. 2 Beat frequency of Rayleigh scattering wave and the first order Brillouin scattering wave

## 2 布里渊频移测量原理

布里渊散射频率  $\nu_B$  与光纤温度  $T$ 、应变  $\epsilon$  成线性关系<sup>[16]</sup>

$$\nu_B = \nu_{B0} + C_T(T - T_R) + C_\epsilon\epsilon \quad (5)$$

式中  $T_R$  为参考温度;  $\nu_{B0}$  是参考布里渊频率, 即在无应变且温度为  $T_R$  时的布里渊散射频率;  $C_T$ 、 $C_\epsilon$  分别是温度系数和应变系数. 对于 SMF 光纤在工作波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  时,  $C_T$  和  $C_\epsilon$  的典型值分别为  $1.05$  MHz/°C 和  $0.048\,3$  MHz/ $\mu\epsilon$ , 令  $\Delta\nu_{\epsilon T} = C_T(T - T_R) + C_\epsilon\epsilon$ , 则由式(5)得到

$$\Delta\nu_{\epsilon T} = \nu_{B0} - \nu_B = \Delta\nu_B - (\nu_0 - \nu_{B0}) \quad (6)$$

式(6)可用图 3 所示的示意图表示, 这表明若引入参考布里渊频率  $\nu_{B0}$ , 则探测布里渊频移量  $\Delta\nu_B$  的问题就转化为探测由应变或温度引起的附加布里渊频移量  $\Delta\nu_{\epsilon T}$  的问题, 而  $\Delta\nu_{\epsilon T}$  的变化量通常在数十 MHz, 也就是说将对  $11$  GHz 微波频率信号转化为对 MHz 频率信号的探测.

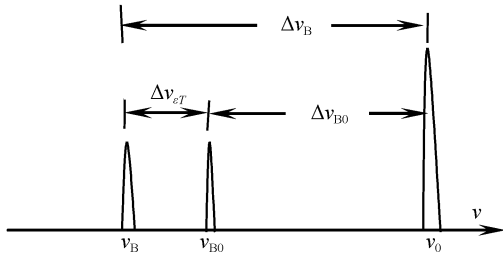


图 3 布里渊散射谱  
Fig. 3 Schematic diagram of Brillouin scattering

根据上述分析提出了基于 BOTDA 原理的分布式布里渊传感器的新的探测方法,如图 4(a). 参考布里渊频率  $\nu_{B0}$  由第 2 节的光纤布里渊频移器产生,假设光纤频移器中的光纤和传感光纤均采用同一种光纤,并采用同一激光源  $\nu_0$ ,控制参考光纤的温度为参考温度  $T_R$ ,应变为 0,则由式(5)可知光纤频移器中产生的布里渊频率正好是参考布里渊频率  $\nu_{B0}$ ,  $\nu_{B0}$

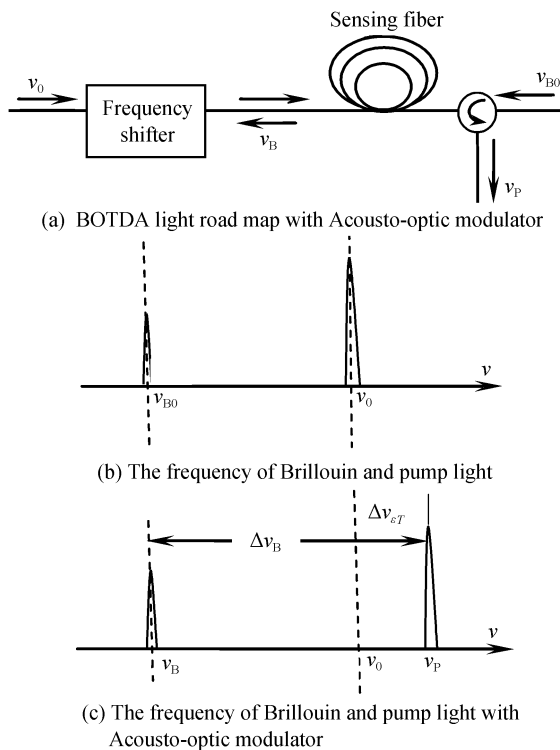


图 4 布里渊频移测量原理  
Fig. 4 Measurement theory for Brillouin frequency shift

经过光纤环行器后入射进入传感光纤. LD 输出的激光  $\nu_0$  通过移频器(采用声光或电光调制器)将变换为  $\nu_P$ , 当调节移频器的频率为  $\Delta\nu_{\epsilon T}$  时,即当  $\nu_P = \nu_0 + \Delta\nu_{\epsilon T}$  时,传感光纤产生的背向布里渊频率  $\nu_B$  (如图 4(c))等于参考布里渊频率  $\nu_{B0}$  (如图 4(b)),此时泵浦光  $\nu_P$  的能量通过光纤介质的感应声波场转化为 Stokes 光能量,泵浦激光被损耗,这样就可以通过探测泵浦光  $\nu_P$  的最小光强值来确定布里渊频移  $\Delta\nu_B$ .

很显然,上述操作只需调节移频器的频率,而该频率最大在数十 MHz 以内,因此整个测量过程中仅对该频率的信号进行调节处理,避免了现有 BOTDA 系统对 11 GHz 左右的微波信号进行探测处理,系统结构将大大简化,成本显著减低.

另一方面,假设 LD 输出的激光频率  $\nu_0$  波动量为  $\Delta\nu_0$ ,此时光纤频移器输出频率  $\nu_{B0} = (\nu_0 + \Delta\nu_0) - \Delta\nu_{B0}$ ,而入射传感光纤频率  $\nu_P = (\nu_0 + \Delta\nu_0) + \Delta\nu_{\epsilon T}$ ,可以得到传感光纤的布里渊频移量为

$$\Delta\nu_B = \nu_P - \nu_{B0} = \Delta\nu_{B0} + \Delta\nu_{\epsilon T} = \Delta\nu_B$$

很显然,该结果与没有波动量时的式(6)的结果完全相同,因此采用该方法可以降低对激光频率稳定性的要求.

### 3 传感系统组成及实验结果

分布式布里渊光纤传感系统实验装置如图 5. LD 输出激光经过 99 : 1 的分束器后,其中一束(1%)光经过 100 MHz 的低频相位调制器 EOM,可以改变光束频率上移 0~100 MHz;作为泵浦光入射进传感光纤;另一束(99%)入射到光纤布里渊频移器,其输出光经过声光调制器 AOM 调制成脉冲光,作为 Stokes 光(探测信号光)从传感光纤的另一端入射进光纤. 声光调制器的中心频率为 100 MHz,将改变光束上频移 100 MHz. 这里采用 EOM 和 AOM 组合构成移频器是为了避免 EOM 频移量小时 EOM 的另外一个边带起作用造成测量错误. 扫

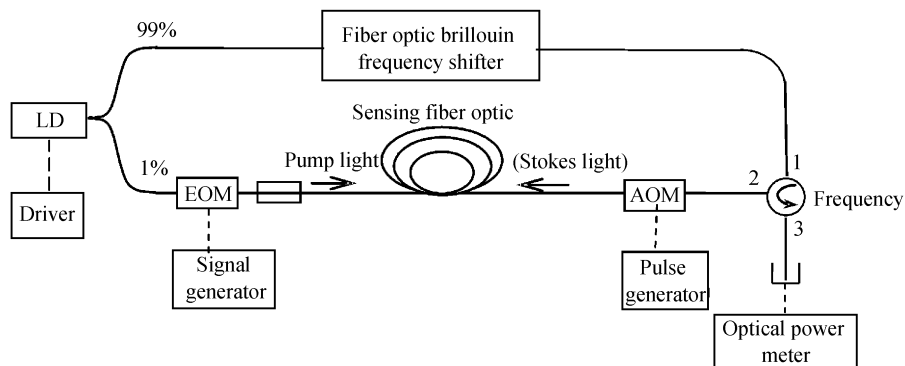


图 5 分布式布里渊光纤传感系统实验装置  
Fig. 5 Set up of distributed Brillouin fiber optic sensing system

描低频相位 EOM 频率,就可以获得沿光纤布里渊谱的分布,由此可计算出光纤温度或应变分布.

实验中,传感光纤和光纤布里渊频移器中的光纤均采用康宁 SMF-28 普通石英单模通信光纤,长度分别为 4 km 和 500 m.为了证明本文提出的光纤移频分布式布里渊光纤传感技术的可行性,对传感光纤进行了温度测量实验.光纤布里渊频移器放置在恒温箱内,温度保持  $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ,将传感光纤放在温控箱内,在温控箱温度分别为  $25^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ 、 $45^\circ\text{C}$ 、 $55^\circ\text{C}$  时测得的布里渊散射光谱如图 6(a),在图 6(b)中同时示出了采用传统方法测得的布里渊散射光谱.可以看出,采用本文提出的方法与采用传统的方法测得的数据基本一致.

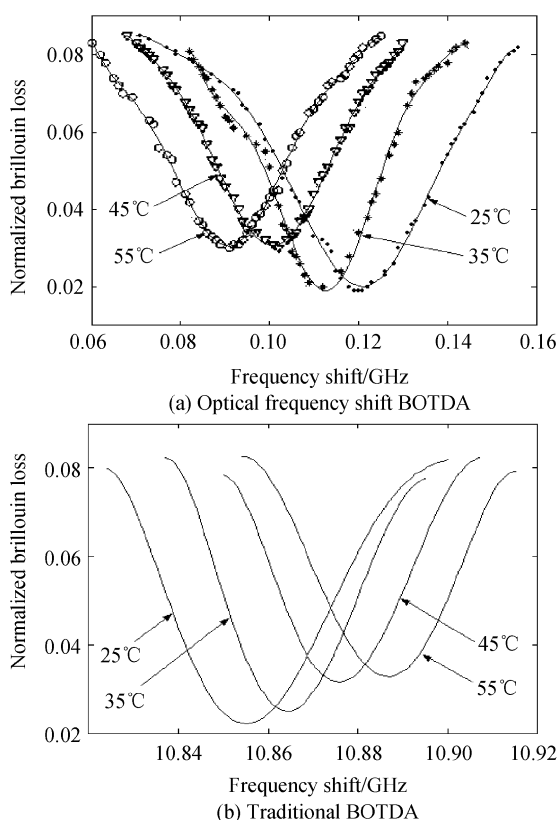


图 6 在不同温度时的布里渊散射光谱  
Fig. 6 Brillouin scattering spectrum at different temperatures

图 7 为测得的布里渊频移随温度变化的实验数

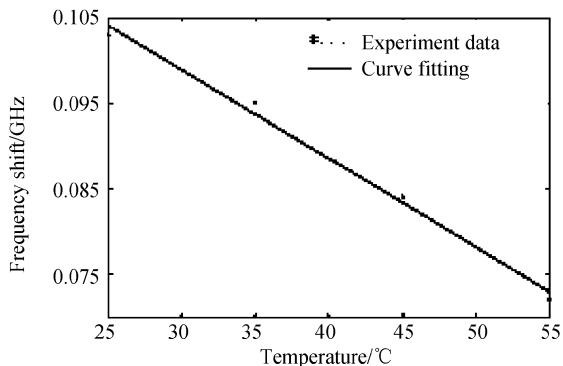


图 7 布里渊频移随温度关系  
Fig. 7 Change in Brillouin frequency shift with temperature

据及通过最小二乘法的拟合后的结果,可以计算出温度系数  $C_T = 1.05 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ .

图 8 为用示波器取代光功率计时观测到的沿光纤长度的温度分布.探测光脉冲宽度设置为  $2 \mu\text{s}$ ,将 8 km 的传感光纤分三段, a、b、c 的长度分别为 1 km、3 km、4 km,中间段 b 放入温控箱中,把温控箱加热到  $55^\circ\text{C}$ ,环境温度  $25^\circ\text{C}$ ,频差调到 10.859 GHz,这个频差正好能使  $25^\circ\text{C}$  的光纤发生受激布里渊散射光放大作用.由于采用的是一个反相放大器,实验结果表明置于温控箱外的光纤发生了受激布里渊散射光放大作用,而置于温控箱内的光纤没有发生.

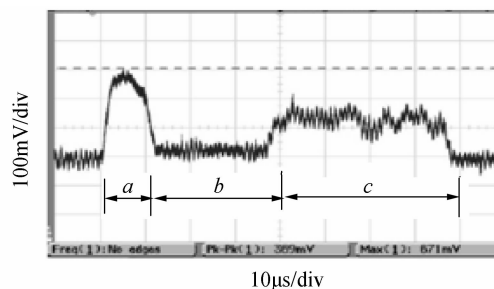


图 8 光纤温度分布测量  
Fig. 8 Distributed measurement of temperature along Fiber optic

### 4 结论

在单纵模窄线宽 cw 光泵浦条件下,在光纤布里渊环形腔中可以获得窄线宽的受激布里渊散射光,将此光作为 BOTDA 系统中的斯托克斯光,可使传感系统具有结构简单、成本低、对激光器要求较低等优点.本文通过实验初步验证了该方法的可行性,下一步将开发输出激光稳定的、线宽小于 100 kHz 的光纤布里渊频移器.

### 参考文献

- [1] HUANG Jun-fen, HUANG Min-shuang, TANG Jian. High spatial resolution distributed optical fiber sensing technology research[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46** (11): 47-50.  
黄军芬,黄民双,唐建.高空间分辨率分布式光纤传感技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11):47-50.
- [2] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M, HANDEREK V A, et al. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, **9**(7): 979-981.
- [3] WAIT P C, NEWSON T P. Landau placzek ratio applied to distributed fibre sensing[J]. *Optics Communications*, 1996, **122**(4-6): 141-146.
- [4] WAIT P C, HARTOG A H. Spontaneous brillouin-based distributed temperature sensor utilizing a fiber Bragg grating notch filter for the separation of the brillouin signal[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(5): 508-510.
- [5] MAUGHAN S M, KEE H H, NEWSON T P. A calibrated 27-km distributed fiber temperature sensor based on microwave heterodyne detection of spontaneous Brillouin scattered power

- [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(5): 511-513.
- [6] IZUMITA H, SATO T, TATEDA M, *et al.* Brillouin OTDR employing optical frequency shifter using side-band generation technique with high-speed LN phase-modulator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, **12**(12): 1674-1676.
- [7] NIKLÈS M, THÉVENAZ L, ROBERT P. Brillouin gain spectrum characterisation in single-mode optical fibres [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(10): 1842-1851.
- [8] SONG Mou-ping, FAN Sheng-li, CHEN Hao, *et al.* Study on the technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on optical interferometric heterodyne detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 233-236.  
宋牟平, 范胜利, 陈好, 等. 基于光相干外差检测的布里渊散射 DOFS 的研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 233-236.
- [9] HORIGUCHI T. A technique to measure distributed strain in optical fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, **2**(5): 352-354.
- [10] BAO X, WEBB D J, JACKSON D A. 32-km distributed temperature sensor based on Brillouin loss in an optical fiber [J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(18): 1561-1563.
- [11] HUANG Min-shuang, ZENG Li, TAO Bao-qi, *et al.* BSBS F-Shift depend on doped silica core single-mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(12): 1107-1110.  
黄民双, 曾励, 陶宝祺, 等. 掺杂石英系单模光纤对 BSBS 频移的影响[J]. 光子学报, 1998, **27**(12): 1107-1110.
- [12] YUN Peng, CHI Rong-Hua, LI Yi-Gang, *et al.* Study on Brillouin-Rayleigh scattering under Raman pump [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(12): 4229-423.  
运鹏, 迟荣华, 李乙钢, 等. 拉曼抽运下的布里渊-瑞利散射研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(12): 4229-423.
- [13] YAN Feng-ping, SHAN Ying, JIAN Shui-sheng. Study on threshold power of the fiber source for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros (SBS-FOG) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **27**(9): 790-794.  
延凤平, 单英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光纤光源的阈值光功率研究[J]. 中国激光, 2000, **27**(9): 790-794.
- [14] YAO Qiong, SONG ZHANG-qi, XIE Yuan-ping, *et al.* Study on the characteristics of fiber optic resonator ring for resonator fiber optic gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 676-680.  
姚琼, 宋章启, 谢元平, 等. 谐振腔光纤陀螺光纤谐振环特性研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(4): 676-680.
- [15] SHEN Ying, WANG Rong, PU Tao. A novel technique to generate high-frequency microwave signal based on high-order stimulated Brillouin scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1571-1575.  
沈颖, 王荣, 蒲涛. 基于高阶受激布里渊散射的高频微波信号产生技术[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1571-1575.
- [16] HUANG Min-shuang, ZENG Li, TAO Bao-qi, *et al.* Parameter calculation of distributed optical fiber strain sensor based on Brillouin scattering [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 1999, **20**(2): 137-140.  
黄民双, 曾励, 陶宝祺, 等. 分布式光纤布里渊散射应变传感器参量计算[J]. 航空学报, 1999, **20**(2): 137-140.

## Distributed Fiber Optic Brillouin Sensing Technique with Frequency Shifting

HUANG Min-shuang, HUANG Jun-fen

(*Opto-Mechatronic Equipment Technology Beijing Area Major Laboratory, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China*)

**Abstract:** A novel method to implement distributed fiber optic Brillouin sensing was proposed, using the frequency shifting technique via a Brillouin fiber optic ring cavity. The method is based on the Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) principle that a laser beam from single-longitudinal model lasing is divided into two beams; one beam is launched into the Brillouin fiber optic ring cavity to generate the stimulated Brillouin scattering wave of narrow bandwidth as the Stokes wave, the other one is taken as the pump wave through phase modulation at a low frequency; the Stokes and the pump waves counter-propagate along the sensing fiber optic and the Brillouin frequency spectrum is measured to get the temperature or strain in fiber optic. The proposed method translates a microwave frequency signal into a MHz frequency signal for detection and processing with only one laser. The system is simple in structure with low cost and can eliminate the impact of the laser frequency fluctuation on the measurement precision. Experiments show that the method is feasible.

**Key words:** Distributed fiber optic sensor; Brillouin scattering; Fiber optic ring cavity; Brillouin Optical Time-Domain Analysis (BOTDA)